

近赤外線分光撮像装置 SWIMS の 低温結像性能評価

大橋 宗史 (hohashi@ioa.s.u-tokyo.ac.jp),

本原 顕太郎、小西 真広、高橋 英則、加藤 夏子、北川 祐太郎、寺尾 恭範 (東京大学)、山室 智康 (オプトクラフト)

1. イントロダクション

SWIMS (Simultaneous-color Wide-field Infrared Multi-object Spectrograph) とは東京大学アタカマ天文台 (TAO) の第1期近赤外線観測装置であり、以下の特徴を持つ。

- $\phi \sim 9'.6$ の広い視野
- ダイクロイックミラーを用いた $0.9 - 1.4 \mu\text{m}$ と $1.4 - 2.5 \mu\text{m}$ の同時観測
- 8つの中帯域フィルターと10の狭帯域フィルター
- 波長分解能 $\lambda/\Delta\lambda \sim 1000$ での多天体分光 (最大40天体)

2017年度にはすばる望遠鏡に取り付けて試験観測を行う予定である。

SWIMSは光学系の温度を65Kに設定して設計を行っている (Fig.3)。しかし熱流入が想定よりも大きく、設計温度よりも高温 ($\sim 100\text{K}$ @ カメラレンズ) になってしまうことがわかった。その結果、熱膨張や屈折率の温度変化によるずれと見られる現象が確認された (Sec.3)。

そこで我々は光線追跡による結像位置の温度依存性をシミュレーションし (Sec.4)、様々な温度の下で結像位置を測定した結果との比較を行った (Sec.5)。なお以下ではカメラレンズの温度をSWIMSの温度として表記する。

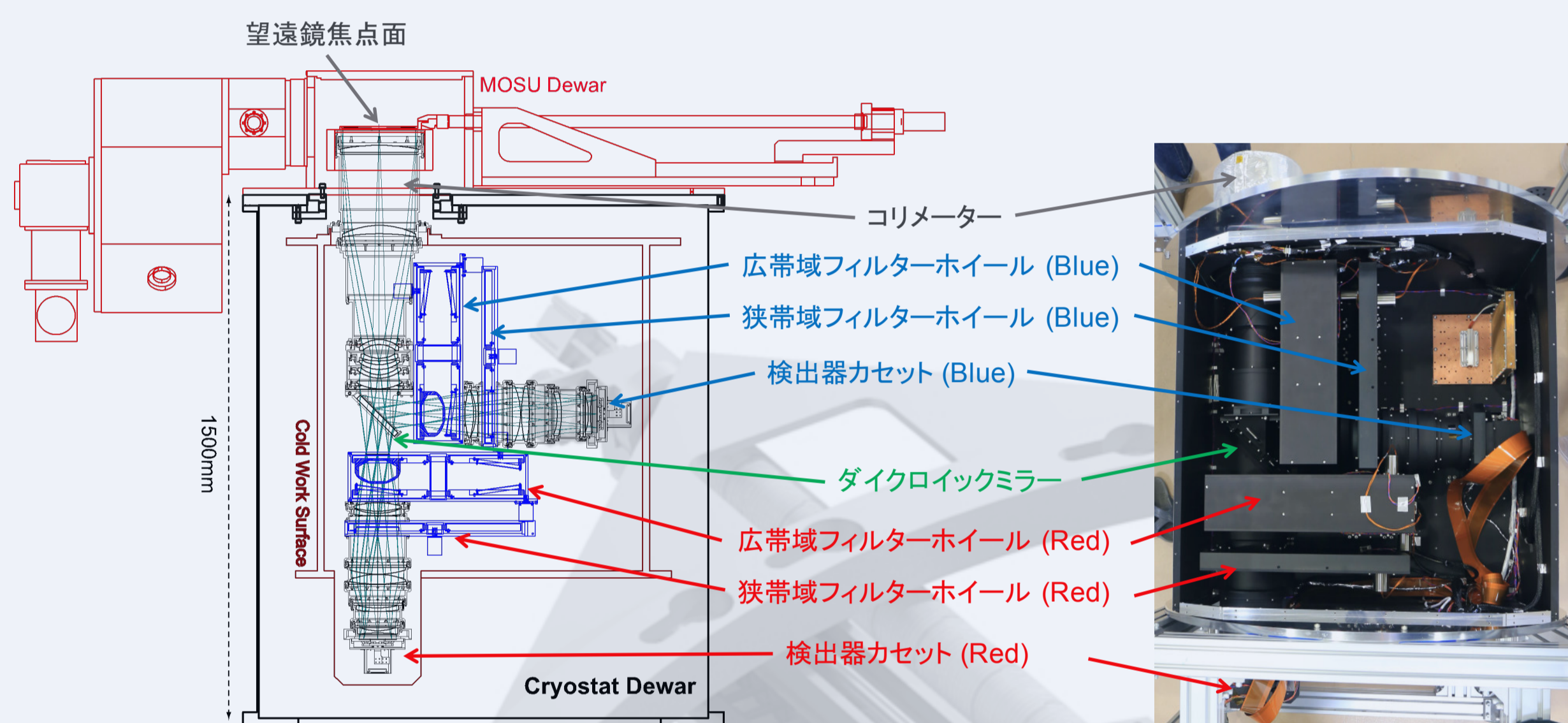


Figure 1. SWIMSの光学系のレイアウト

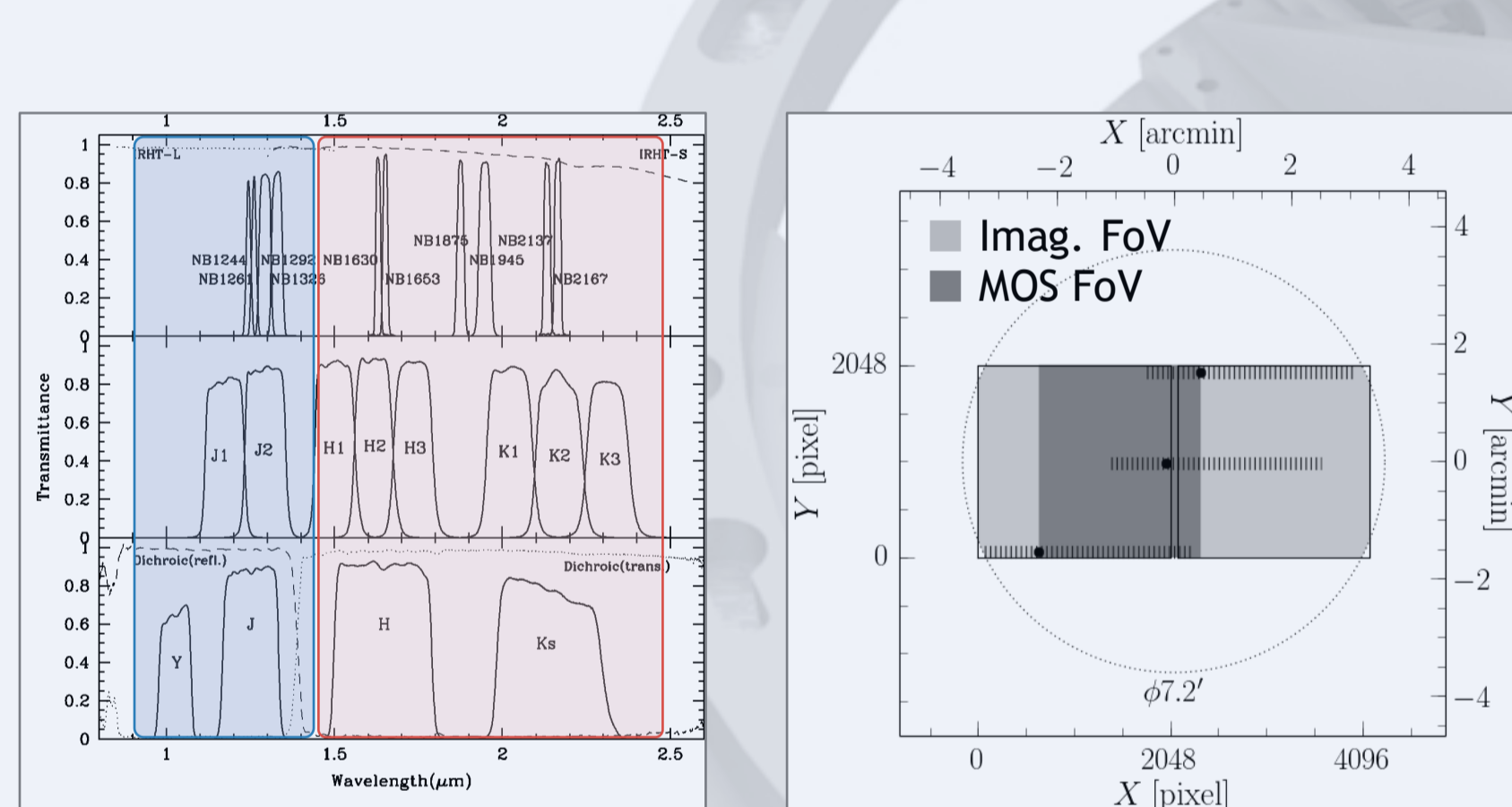


Figure 2. (左) フィルターの透過曲線。(右) 視野のレイアウト

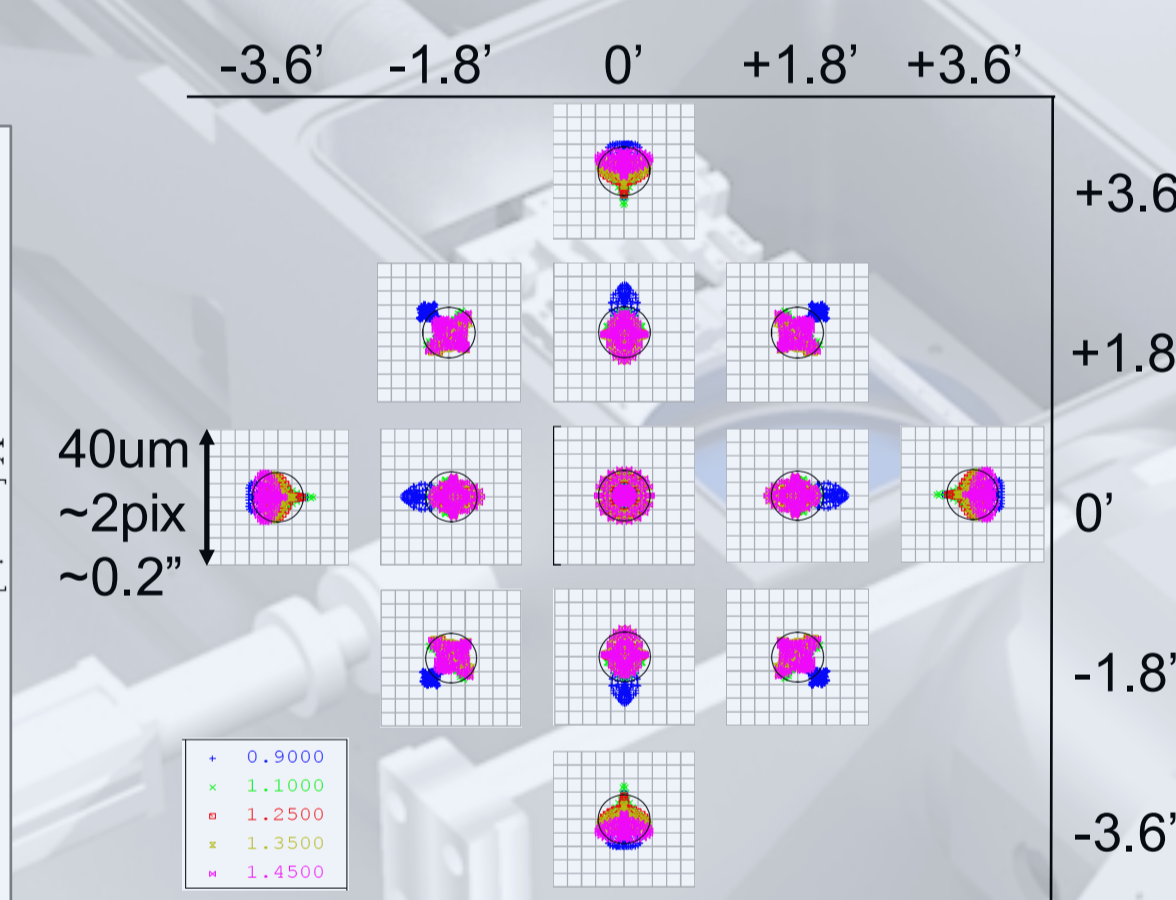


Figure 3. 65Kの設計段階での光線追跡結果

2. 結像試験のセットアップ

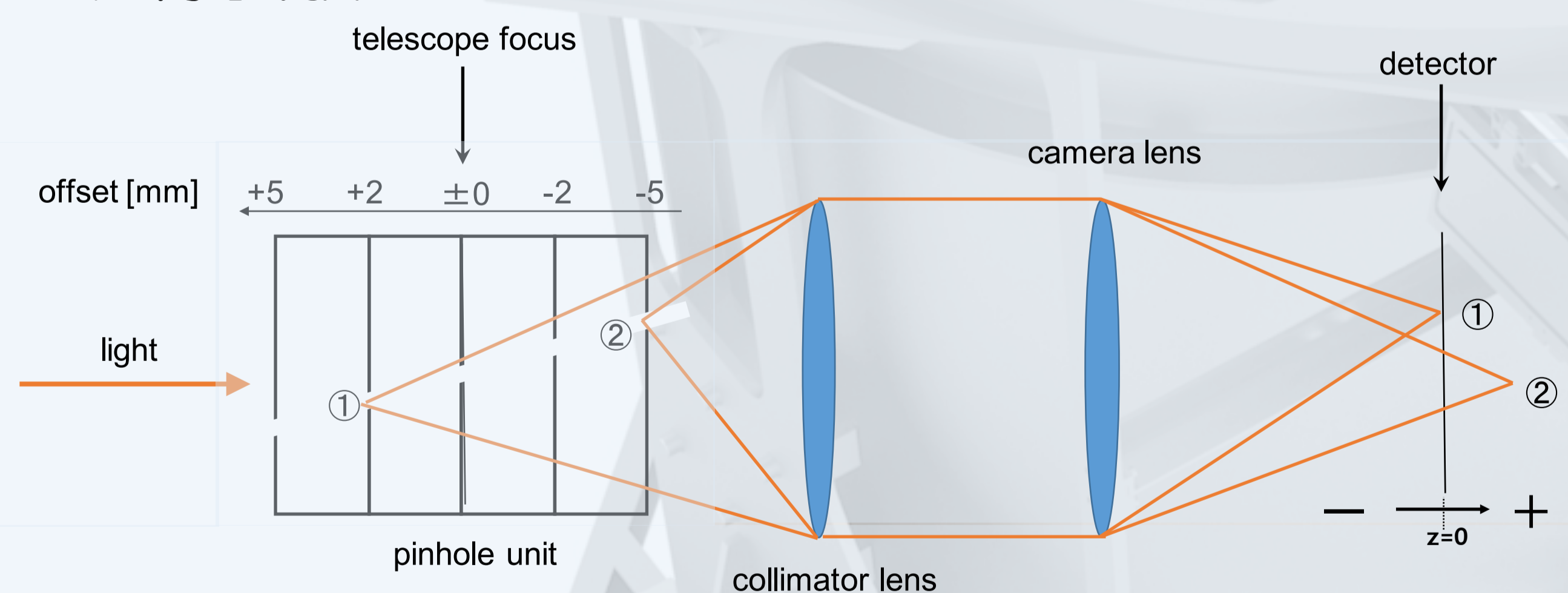
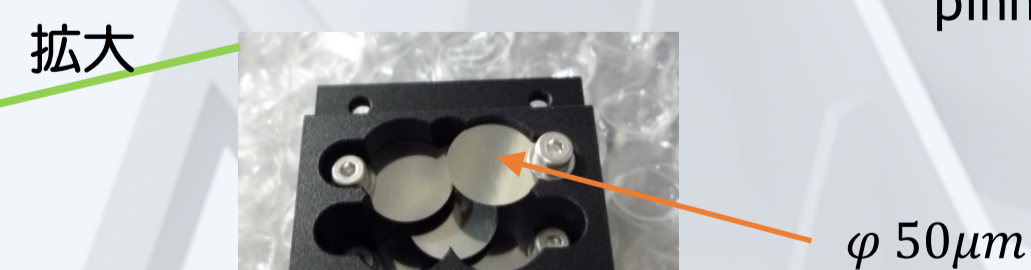
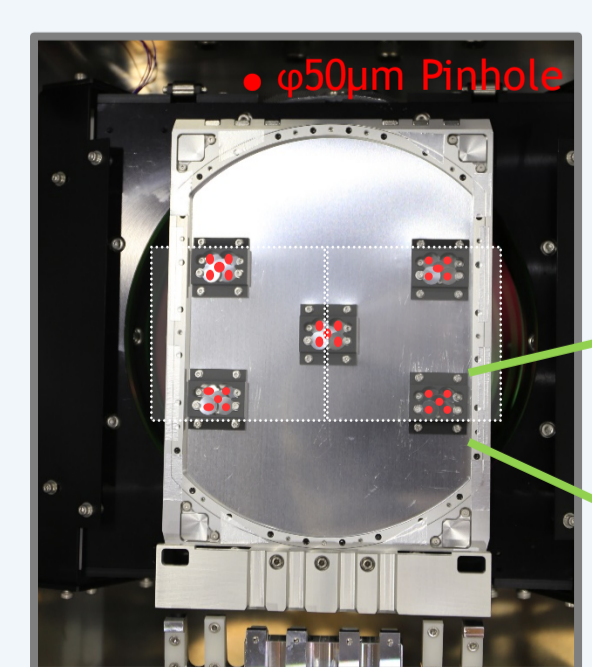


Figure 4. 結像試験のレイアウト
光軸上の検出器位置をz座標の原点とする。
pinhole offsetは便宜上図のように取る。



結像試験の概略図をFig.4に示す。どのoffsetのpinholeが検出器上で結像するかを調べることによって、結像位置のずれを測定することができる。

3. 結像試験の結果

結像試験の結果をFig.5に示す。この図より以下のことが分かる。

- 105K-110Kが現在の仕様で運用する際の最適温度である (105-110KでFWHMが最小値を取る)。
- また光学系の温度を90K→110Kと上昇させると、fittingした放物線のbottom topがずれていく。これについてはSec.5で議論する。

なお、FWHMが1pixと小さい場合の測定誤差は最大4%であるため、今回の結果には影響しない。

波長	0.9-1.4μm		1.4-2.4μm	
	80K	100K	80K	100K
鏡筒の膨張	-0.04mm	-0.12mm	-0.02mm	-0.07mm
レンズの膨張	+0.16mm	+0.26mm	+0.10mm	+0.20mm
屈折率変化	+0.29mm	+0.69mm	+0.33mm	+0.73mm
合計	+0.43mm	+0.92mm	+0.34mm	+0.81mm
dz/dT [mm/K]	0.029	0.026	0.023	0.023

Table 1. 光学系の温度を変化させた時の結像位置変化をシミュレーションした結果。座標の取り方はFig.3を参照。

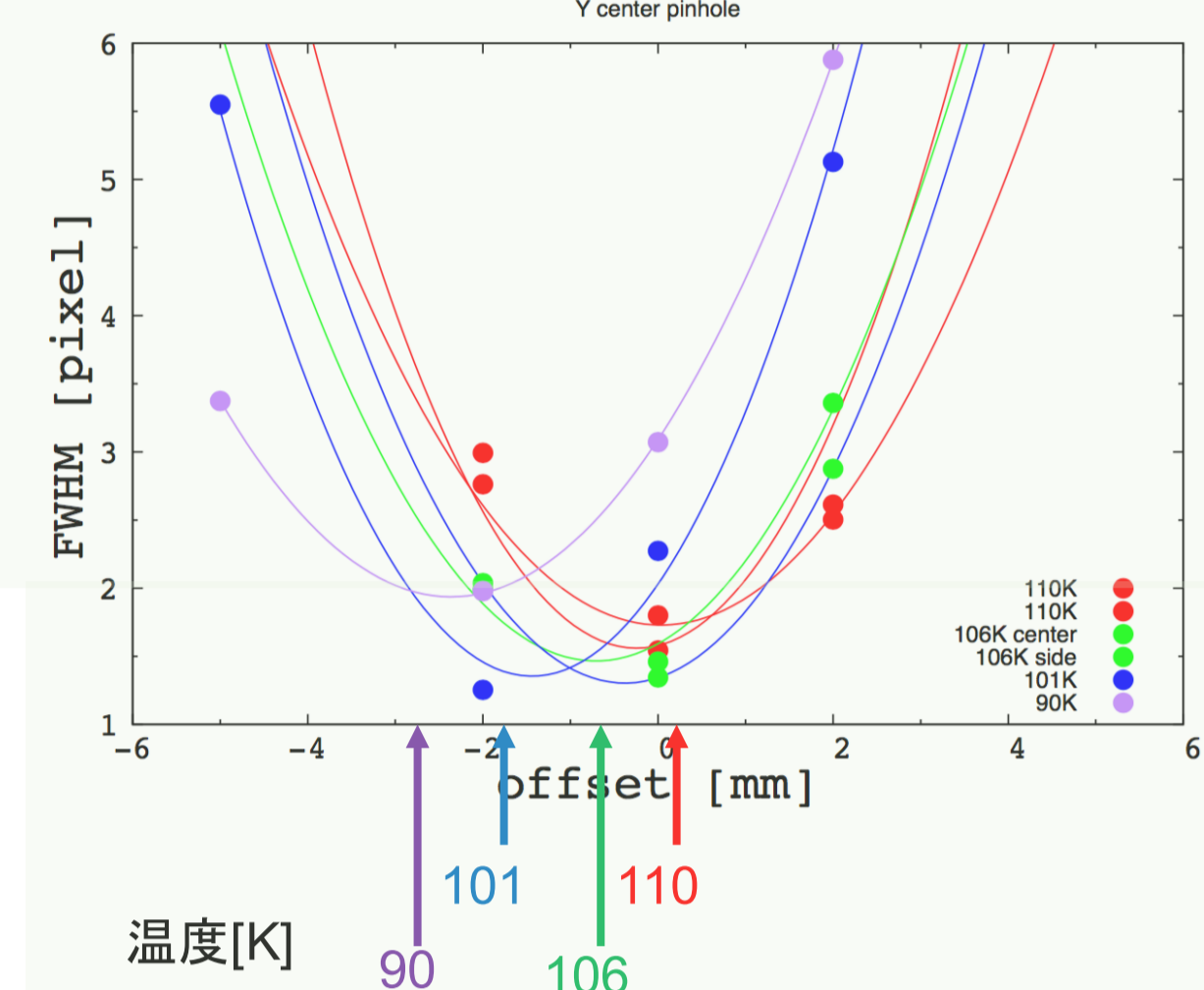
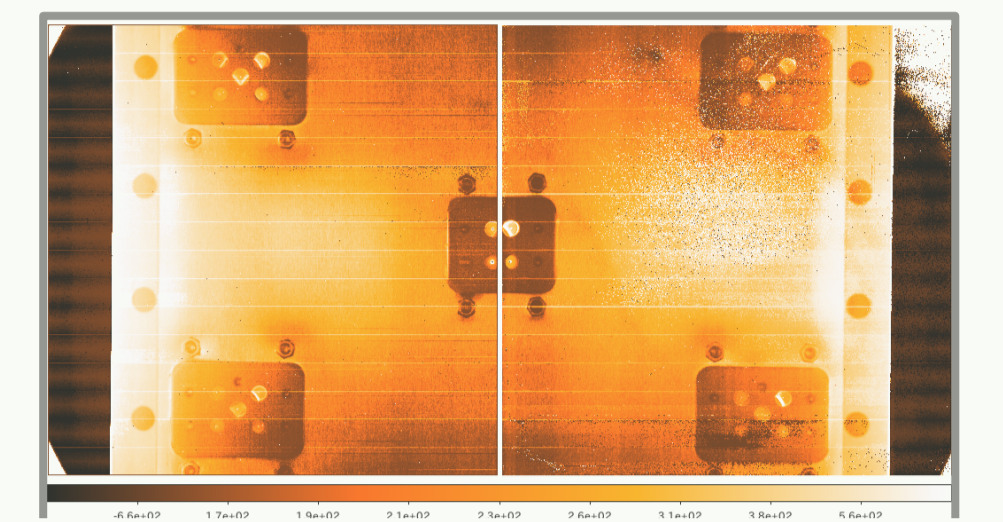


Figure 5. Yフィルターでの結像試験の結果。
横軸はpinholeのoffset、縦軸はpinhole像のFWHM。
色の違いは試験を行った温度の違いを表す。

4. 結像位置の温度依存性のシミュレーション

次の3つの効果を考慮した上で、65Kで結像するセットアップから80K, 100Kに変化させ、光線追跡によるシミュレーションを行った。ただし光学系の温度は一様と仮定している。

1. 鏡筒の熱膨張
 - 光学系の一様な膨張を仮定。
2. レンズの熱膨張
 - 光学系の一様な膨張を仮定。
 - <100Kでは線膨張係数が常温の30%になると仮定。
3. 屈折率の温度依存性
 - <100Kでの屈折率の温度変化を二次曲線で近似し (Yamamuro et al. 2006)、各温度での屈折率を内挿。波長依存性はSellmeierの分散式で補間。

結果をTable 1.に示す。この表から以下のことがわかる。

- 100Kに温度が上昇した場合に最大で1mm弱程度、ベストフォーカス位置がずれる。
- その内訳をみると、屈折率の温度依存性がSWIMSでは強く効いている

なお実際の光学系には数十度程度の温度勾配が存在しているが、温度勾配を考慮して光線追跡を行った結果は数%から最大30%程度の違いしか得られなかった。

5. 議論

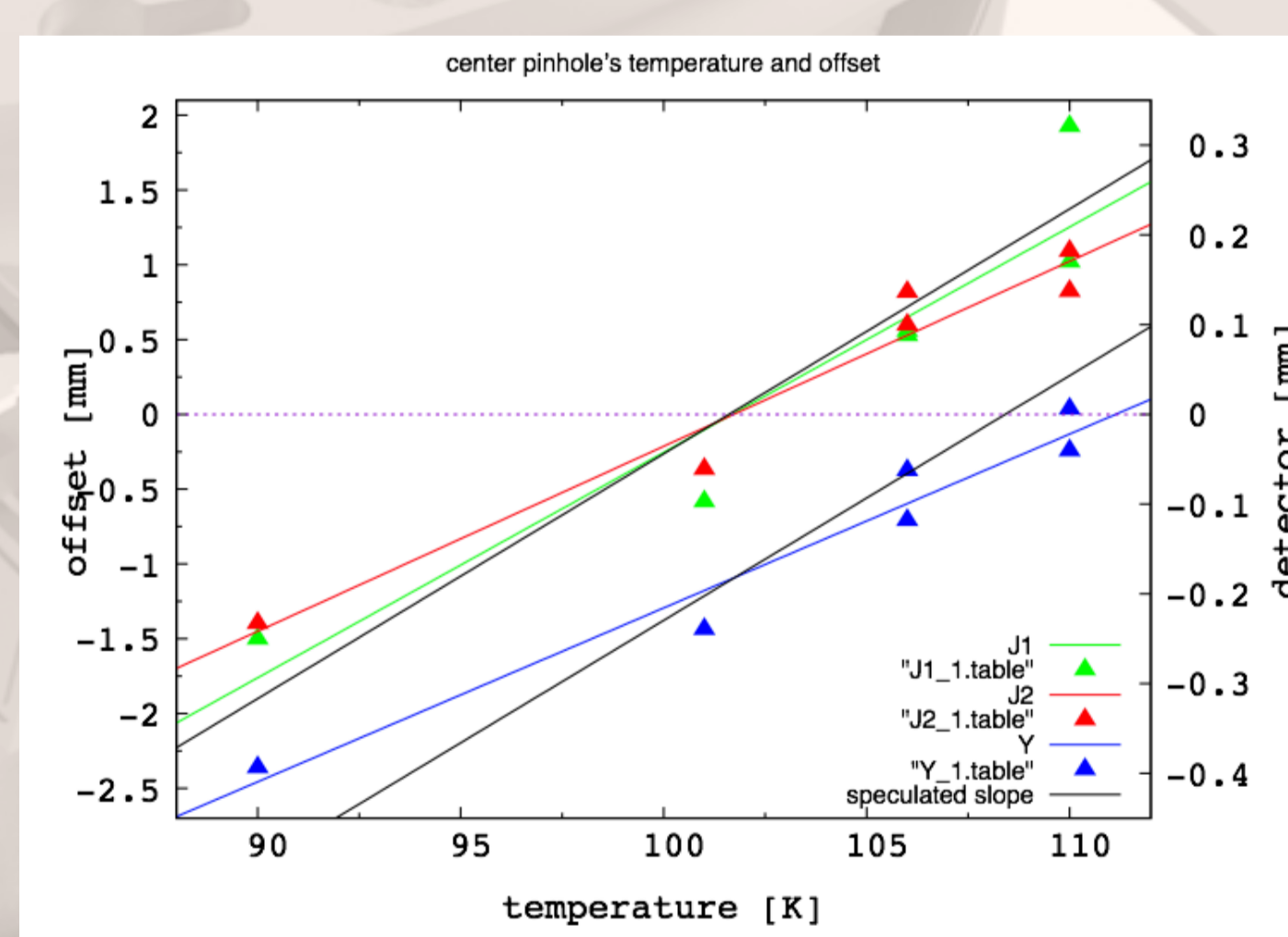


Figure 6.
Sec.3でfittingした放物線のbottom topの温度依存性を示した図。
色の違いは測定したフィルターの違いを表す。
黒い線は光線追跡で得られた傾きの直線。

検出器位置の温度ずれについて試験結果とシミュレーション結果をまとめると次のようになる。

- 試験では $dz/dT \leq 0.025 \text{ mm/K}$ という値が得られた。
- シミュレーションでは、 $dz/dT \sim 0.025 \text{ mm/K}$ と予測された。

これら2つの数値はコンシステントであり、シミュレーションによって結像の温度依存性は再現することができたと考えられる。

ただし今回はレンズの熱膨張として<100Kでの線膨張係数を30%と仮定しているため、より正確なシミュレーションを行うためには、<100Kでのレンズの線膨張係数の測定が必要である。

6. まとめ

- 100Kという低温であっても、温度変化による結像位置のずれを予測できることが実証された。
- SWIMSのカメラ光学系の温度が $100\text{K} \pm 10\text{K}$ であればフォーカスに大きな影響はないことが試験で確認された。
- 外部環境温度の変化により内部温度が変化し (例えばマウナケア山頂では三鷹の実験室よりも低温に達すると期待される)、フォーカスずれが生じたとしても、今回得られた dz/dT を用いることで最適な検出器位置を容易に計算でき、現地での調整が軽減されると期待される。